

На правах рукописи

Панковец Владимир Васильевич

АНАЛИЗ МЕТЕОРНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО РАДИОКАНАЛА  
С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ ЛУЧЕЙ

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе  
системы и устройства радионавигации,  
радиолокации и телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук



Казань 2002

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Казанского государственного университета

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук  
профессор В.В.Сидоров

Официальные оппоненты: доктор тех. наук,  
профессор Ю.Е. Седельников

кандидат физ.-мат. наук,  
доцент Р.Г.Хузяшев.

Ведущая организация: Марийский Государственный Технический  
Университет, г.Йошкар-Ола

Защита состоится 26.12.2002 г. в 14 часов  
на заседании диссертационного Совета Д212.081.18 Казанского  
государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу:  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская. 18 в аудитории 210 физ. корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета  
Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор физ.-мат. наук, доцент



А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена теоретическим исследованиям многолучевых метеорных радиоканалов с конечным числом лучей. В ней рассмотрены все варианты наложения двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных радиосигналов на элементарном тактовом интервале, проделаны выводы аналитических выражений интегральных функций распределения (ИФР) энергии этих сигналов на элементарном тактовом интервале, на основе аналитических выражений ИФР энергии вычислены соответствующие дифференциальные функции распределения (ДФР) энергии. Установлено, что существуют два принципиально различных типа распределения энергии: 1) при наложении однородных сигналов плотность энергии на краях энергетического интервала выше плотности энергии в центре энергетического интервала; 2) при наложении разнородных сигналов, наоборот, плотность энергии на краях энергетического интервала меньше плотности энергии в центре энергетического интервала. Поскольку при наложении двухлучевых сигналов имеют место замирания сигналов, т.е. случайное увеличение и уменьшение энергии (амплитуды) двухлучевого сигнала по сравнению с энергией (амплитудой) однолучевого сигнала, подробно рассмотрены случаи уменьшения энергии двухлучевого сигнала. Будем писать слово *замирания* курсивом для случая уменьшения энергии двухлучевого сигнала в отличие от замираний в общем смысле. Установлено, что *замирания* при наложении однородных сигналов в среднем в три раза больше, чем при наложении разнородных сигналов. Определены вероятности правильного обнаружения двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных радиосигналов на элементарном тактовом интервале. Получены оценки погрешности момента прихода двухлучевого радиоимпульса для двух способов оценки момента прихода: по моменту пересечения уровня и по моменту максимума выходного напряжения. Проведен анализ специальной метеорной системы синхронизации шкал времени в условиях многолучевости: системы с опорной шкалой времени и с инверсией времени поступления отдельных лучей при ретрансляции их. Показано, что такая система имеет преимущества при малом числе лучей. Сопоставление полученных выводов с результатами, полученными другими авторами, и с экспериментальными данными подтвердило достоверность результатов диссертационного исследования.

### Актуальность темы и направленность исследования.

Поскольку проблема многолучевости существовала со времени появления радиосвязи и существует до сих пор, постольку решение задач, связанных с многолучевым распространением радиоволн, является актуальным. По мере развития средств связи вопросы многолучевого распространения становятся все более актуальными. Так, например, распространение радиосигналов в городских застройках всегда носит многолучевой

характер, в связи с чем вопросы обеспечения надежной радиосвязи в таких условиях носят актуальный характер.

Все задачи, которые решались в диссертации, возникли на базе работ, проводимых проблемной радиоастрономической лабораторией (ПРАЛ) Казанского государственного университета. ПРАЛ более трех десятков лет изучала метеорное и ионосферное распространение радиоволн, в том числе многолучевое. Поскольку основное количество метеорных многолучевых сигналов являются двухлучевыми и трехлучевыми, постольку в диссертации определяются интегральные и дифференциальные функции распределения энергии двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных радиосигналов на элементарном тактовом интервале. Знание таких функций позволяет определить все другие статистические характеристики метеорного многолучевого канала: вероятность правильного обнаружения, вероятность ложной тревоги, вероятность замираний, вероятность ошибки и т.д., что может войти в состав многолучевой компьютерной модели метеорного радиоканала.

Актуальными являются вопросы оценки погрешности момента прихода радиоимпульса для метеорных систем синхронизации шкал времени. Поэтому необходимо было выяснить изменение погрешности момента прихода радиоимпульса для многолучевого сигнала. В диссертации рассмотрены среднеквадратичные погрешности оценки момента прихода двухлучевого радиосигнала для двух основных способов измерения момента прихода: 1) по моменту прохождения выходного напряжения через заданный уровень и, 2) по положению максимума выходного напряжения. Полученные оценки сравниваются с соответствующими оценками для однолучевого сигнала.

Также актуальными являются различные способы, которые позволяют бороться с увеличением погрешности оценки момента прихода радиоимпульса при многолучевом распространении радиоволн. В диссертации описан один из способов борьбы с многолучевостью в метеорной системе синхронизации шкал времени, при котором для обоих пунктов синхронизации А и Б вводится единая опорная шкала времени и проводится инверсия последовательности принятых сигналов в многолучевом пакете относительно опорной шкалы времени при их ретрансляции. В такой системе возникает специфический шум, который назван системным шумом. Определены характеристики такого шума, найдены вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги сигнала в такой системе, установлены преимущества такой системы для малого числа лучей.

Цель работы. Рассмотрение всех вариантов наложения двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных сигналов с целью вычисления интегральных функций распределения энергии на элементарном тактовом интервале, количественная оценка *замираний* и вероятностей правильного обнаружения отдельных типов таких сигналов, определение

среднеквадратичной погрешности момента прихода двухлучевого радиоимпульса методом пересечения порога и методом выделения максимума выходного напряжения, определение возможности приема многолучевого сигнала в системе синхронизации шкал времени с опорной шкалой и с инверсией сигналов.

Наиболее существенные результаты, полученные лично автором, и их новизна

1) Впервые рассмотрены все четыре случая наложения двоичных фазоманипулированных и частотно-манипулированных метеорных радиосигналов и определена их энергия на элементарном тактовом интервале при одной случайной величине — времени задержки второго сигнала относительно первого.

2) Впервые получены аналитические выражения для интегральных функций распределения энергии двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных метеорных радиосигналов на элементарном тактовом интервале.

3) Впервые получены количественные оценки *замираний* двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных радиосигналов на элементарном тактовом интервале.

4) Впервые получены оценки среднеквадратичной погрешности момента прихода двухлучевого радиоимпульса в случае, когда приемное устройство оптимально однолучевому радиоимпульсу, для двух методов оценки момента прихода радиоимпульса: по моменту пересечения порога и по моменту максимума выходного напряжения.

5) Впервые исследованы и получены характеристики системы синхронизации шкал времени через метеорный радиоканал с опорной шкалой времени и с инверсией сигналов в условиях многолучевого распространения сигналов.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

Практическая ценность диссертации заключается в увеличении информации о статистических характеристиках двухлучевого метеорного радиоканала, в новой информации об оценке погрешности момента прихода двухлучевого радиосигнала и новой информации о преимуществах метеорной системы синхронизации шкал времени, в которой существует опорная шкала времени и инверсия многолучевого сигнала.

Результаты, полученные в диссертации, предназначены для предприятий радиосвязи, которые имеют дело с многолучевым распространением радиоволн. В частности, для организаций радиосвязи, которые работают с метеорными многолучевыми каналами, так как там многолучевость чаще всего наблюдается в виде двухлучевости. Эти результаты могут стать частью компьютерной модели метеорного (или ионосферного) многолучевого радиоканала.



### Конкретное личное участие автора в получении научных результатов

Теоретические исследования аналитическими методами выполнены лично автором. Автор лично провел постановку всех задач, решенных в диссертации, кроме задачи определения характеристик метеорного многолучевого инверсного сигнала в системе синхронизации шкал времени с опорной шкалой, общая постановка которой принадлежит научному руководителю. Автором разработаны блок-схемы программ вычисления интегральных и дифференциальных функций распределения энергии двухлучевого сигнала и блок-схемы программ вычисления вероятности обнаружения двухлучевых сигналов. Соавторы диссертанта составили программы и получили необходимые графики. Автором проанализированы полученные результаты и сделаны основные выводы и научные рекомендации.

**Апробация работы.** Результаты диссертации неоднократно докладывались на научных конференциях КГУ, на II республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов (Казань, 1996), депонированы в ВИНТИ, опубликованы в журнале «Радиотехника», опубликованы в сборнике «Прием и обработка информации в сложных информационных системах».

**Публикации.** Автором опубликованы по теме диссертации одна статья в журнале «Радиотехника», семь статей в сборнике «Прием и обработка информации в сложных информационных системах» (КГУ), две статьи депонированы в ВИНТИ, опубликованы тезисы доклада.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем 156 страниц, включая рисунки на 38 страницах и библиографию из 108 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов работы, проведен обзор литературы по теме диссертации, приведена структура диссертации.

В первой главе описана оригинальная методика вывода аналитических выражений частных интегральных функций распределения энергии двухлучевого метеорного фазоманипулированного сигнала для четырех вариантов наложения двухлучевого фазоманипулированного сигнала (рис. 1) на элементарном тактовом интервале и для усредненной интегральной функции распределения энергии. В основе вывода лежит определение энергии на элементарном тактовом интервале: определяется энергия на двух подинтервалах наложения по формуле  $E = (A^2\tau)/2$ , затем их сумма, где  $A$  – амплитуда,  $\tau$  – длительность тактового интервала. Для четырех вариантов наложения получаются четыре выражения для нормированной энергии:  $\xi_1 = 2[1 + (1 - 2\theta) \cos 2k\pi\theta]$ ,  $\xi_2 = 2[1 - (1 - 2\theta) \cos 2k\pi\theta]$ ,

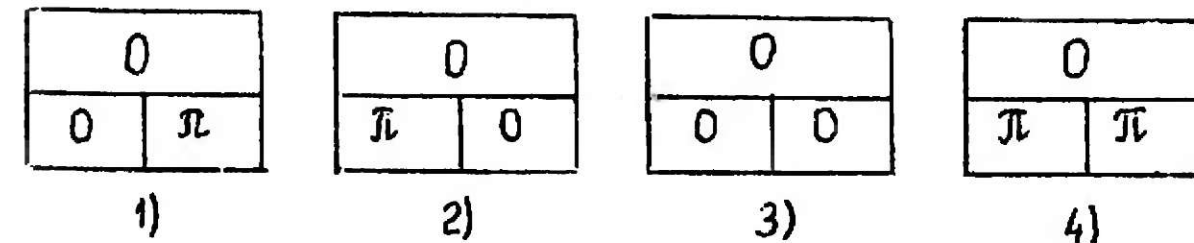


Рис. 1

$\xi_3 = 2(1 - \cos 2k\pi\theta)$ ,  $\xi_4 = 2(1 + \cos 2k\pi\theta)$ , где  $\xi = E_m/E_0$  – нормированная энергия,  $E_m$  – энергия многолучевого сигнала,  $E_0$  – энергия однолучевого сигнала,  $\theta = \tau_3/\tau$  – нормированное время задержки,  $k$  – число периодов высокой частоты. Затем определяется, например, вероятность события  $\xi_1 < x$ , как  $[(1 - 2\theta) \cos 2k\pi\theta] < x$  согласно рис. 2. Эта вероятность считается как сумма промежутков  $\Delta\theta$ , лежащих ниже уровня  $\alpha$ , заштрихованных на рис. 2, отнесенная ко всему интервалу  $\theta = 1$ .

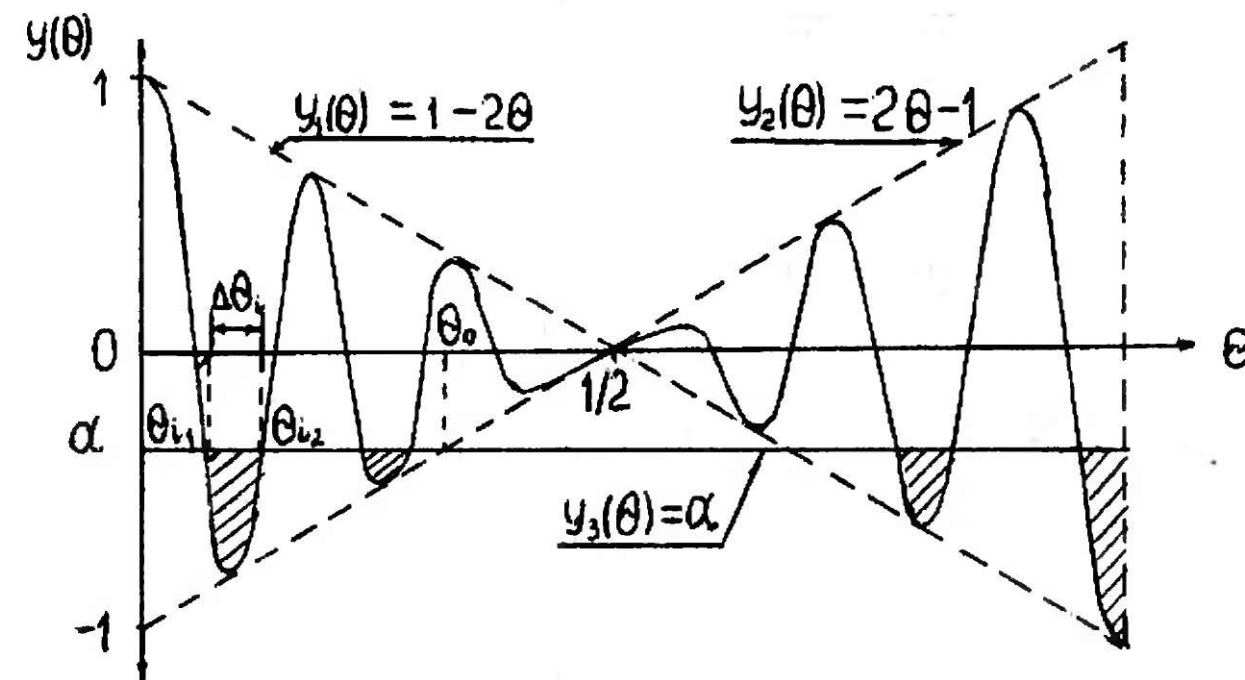


Рис. 2

Получены следующие аналитические выражения интегральных функций распределения энергии двухлучевого метеорного фазоманипулированного сигнала на элементарном тактовом интервале для четырех вариантов наложения и для усредненной функции распределения энергии:

$$F_1(x) = \begin{cases} \frac{2}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[Kx/4]} \arccos \frac{(x-2)/2}{1-2(l-1)/K}, & 0 < x \leq 2 \\ F_2(x) = \frac{1}{K} E\left[K \frac{x-2}{2}\right] + \frac{2}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K \frac{4-x}{2}]} \left[ \pi - \arccos \frac{(x-2)/2}{1-2(l-1)/K} \right], & 2 < x \leq 4 \end{cases} \quad (1)$$

$$F_3(x) = F_4(x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arccos \frac{2-x}{2}, & 0 < x \leq 2 \\ 1 - \frac{\arccos[(x-2)/2]}{\pi}, & 2 < x \leq 4 \end{cases} \quad (2)$$

$$F(x) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 F_i(x) = \frac{1}{2} F_1(x) + \frac{1}{2} F_3(x) =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[ \arccos \left| \frac{x-2}{2} \right| - \frac{2}{K} \sum_{l=1}^{E[Kx/4]} \arccos \frac{|(x-2)/2|}{1-2(l-1)/K} \right], 0 < x \leq 2$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left| \frac{x-2}{2} \right| + \frac{1}{K} E\left[K \frac{x-2}{2}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(4-x)/4]} \left[ \pi - \arccos \frac{|(x-2)/2|}{1-2(l-1)/K} \right] \right\}, 2 < x \leq 4. \quad (3)$$

На основе полученных аналитических выражений ИФР энергии были вычислены соответствующие дифференциальные функции распределения энергии. На рис. 3 (а, б, в) приведены графики дифференциальных функций распределения энергии двухлучевого фазоманипулированного сигнала. Из анализа этих графиков следует важный вывод: существуют два разных типа распределения, один из которых  $f_1(x)$  имеет максимальную плотность распределения энергии в центре энергетического интервала и минимальную — по краям его, а второй,  $f_3(x)$  — наоборот.

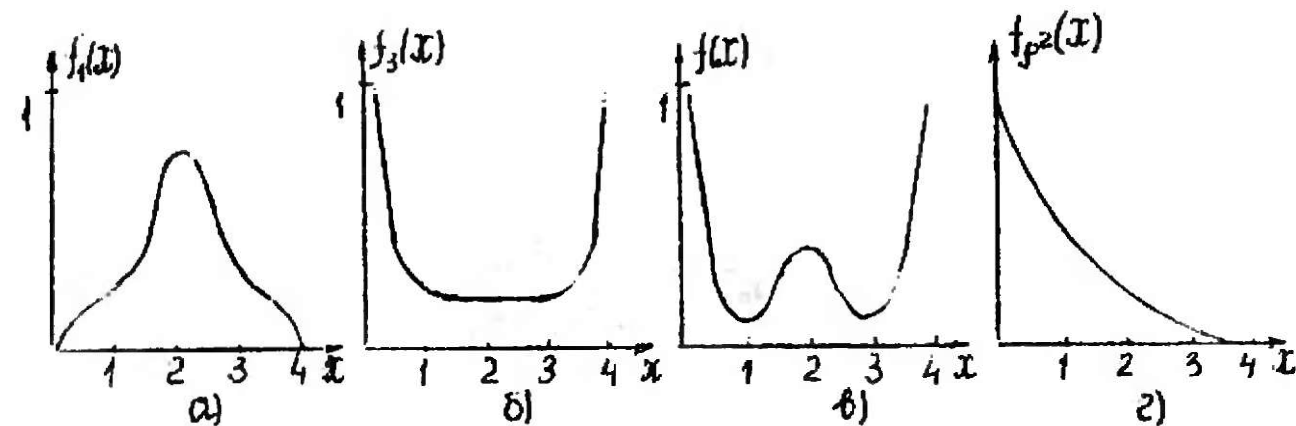


Рис. 3

График 3а соответствует наложению разнородных по фазе элементов  $[0, \pi]$  и  $[\pi, 0]$ . График 3б соответствует наложению однородных элементов  $[0, 0]$  и  $[\pi, \pi]$ . Из рис. 3б видно, что наибольшие замирания имеют место при наложении однородных элементов, о чем также свидетельствует поведение интегральных функций распределения энергии на интервале замираний энергии (рис. 4). Сравнение любой из кривых на рис. 3 а, б, в с графиком распределения квадрата амплитуды рис. 3г, где амплитуда распределена по релеевскому закону, показывает их несовпадение и, следовательно, энергию двухлучевого метеорного фазоманипулированного сигнала нельзя описывать релеевским законом.

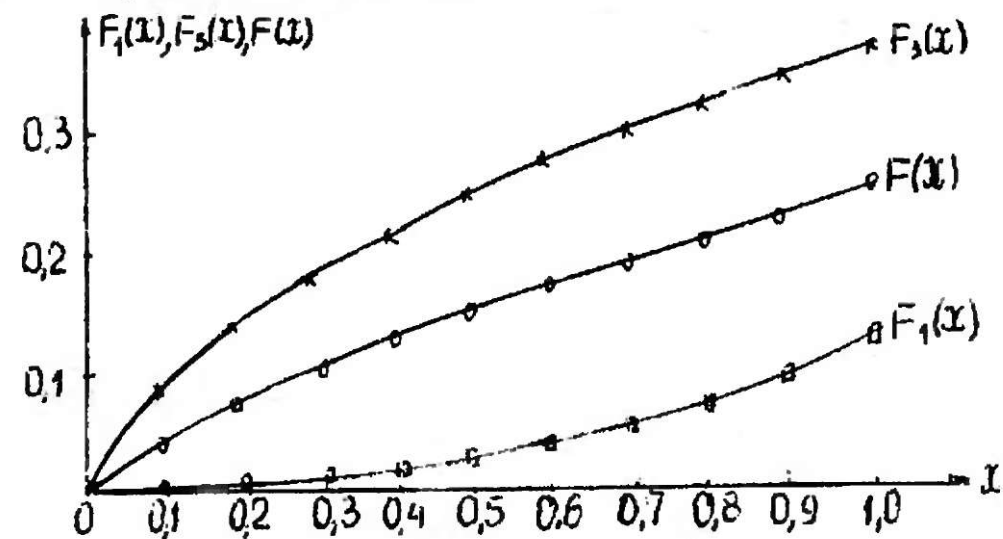


Рис. 4

Была вычислена вероятность правильного обнаружения двухлучевого фазоманипулированного радиоимпульса для случая самых глубоких замираний описываемых функцией  $f_3(x) = 1/\pi \sqrt{x(4-x)}$ . Эта вероятность вычислялась по стандартной методике для сигнала со случайной амплитудой и случайной фазой и было получено сложное выражение

$$D_3 = \int_h^\infty dz \int_0^{N_0/2Z} \frac{2Z}{N_0 E_1} \cdot \frac{\text{EXP}\left(-\frac{Z^2 + \rho^2 E_1^2}{N_0 E_1}\right)}{\pi \sqrt{1 - (\rho/2)^2}} \cdot \left(1 - \frac{\rho^2 Z^2}{N_0^2}\right) d\rho +$$

$$+ \int_h^\infty dz \int_{N_0/2Z}^2 \frac{2Z}{N_0 E_1} \cdot \frac{\text{EXP}\left(-\frac{Z^2 + \rho^2 E_1^2}{N_0 E_1}\right) \cdot \text{EXP}\left(\frac{2\rho Z}{N_0}\right)}{\pi \sqrt{1 - (\rho/2)^2} \sqrt{2\pi \cdot 2Z\rho/N_0}} d\rho. \quad (4)$$

которое было подсчитано методами численного программирования как функция отношения сигнал/шум  $\nu = \sqrt{2E_1/N_0}$ . На рис. 5 построена эта зависимость, где построена также вероятность обнаружения для сигнала с релейским распределением амплитуды. Сравнение этих кривых показывает, что кривая обнаружения двухлучевого метеорного фазоманипулированного сигнала лежит ниже кривой обнаружения релейского сигнала. Так, вероятность обнаружения  $D = 0,95$  двухлучевой сигнал имеет при  $\nu = 30$ , а релейский при  $\nu = 14$ , т.е. отличие по амплитуде составляет 2,1 раза, а отличие по энергии  $\approx 4,5$  раза.

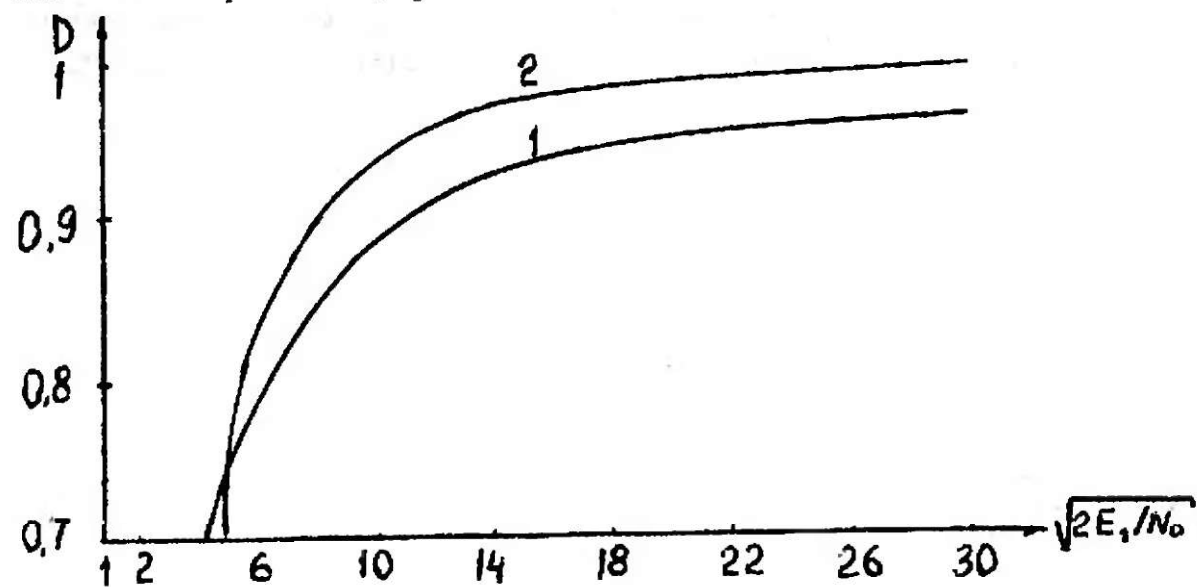


Рис. 5

1 — двухлучевой ФМ сигнал, 2 — релейский сигнал

Во второй главе проделан вывод аналитического выражения интегральных функций распределения энергии двухлучевого метеорного частотно-манипулированного сигнала на элементарном тактовом интервале, аналогичный выводу для фазоманипулированного сигнала. Вначале определяется энергия для четырех вариантов наложения двухлучевого частотно-манипулированного сигнала (рис. 6) на элементарном тактовом интервале, где  $\omega_1, \omega_2$  — несущие частоты двух сигналов, причем рассмотрен слу-

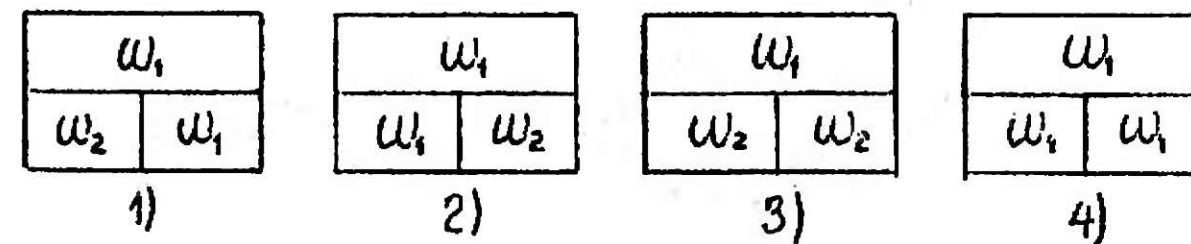


Рис. 6

чай полного разделения сигналов с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Энергия подсчитывается на каждом подинтервале наложения по формуле  $E = A^2 \tau / 2$ , затем определяется их сумма на элементарном тактовом интервале. Для четырех вариантов наложения получаются четыре варианта выражения для нормированной энергии:  $\xi_1 = 1 + (1 - \theta)(1 + 2 \cos 2\pi \theta)$ ,  $\xi_2 = 1 + \theta(1 + 2 \cos 2\pi \theta)$ ,  $\xi_3 = 1$ ,  $\xi_4 = 2(1 + \cos 2\pi \theta)$ , где  $\xi = E_m/E_0$  — нормированная энергия,  $\theta = \tau_3/\tau$  — нормированное время задержки. Затем определяется, например, вероятность события  $\xi_2 < x$ , или  $[1 + \theta(1 + 2 \cos 2\pi \theta)] \leq x$  согласно рис. 7. Эта вероятность также считается, как сумма временных интервалов  $\Delta\theta_i$ , лежащих ниже уровня  $\alpha$  и заштрихованных на рис. 7, отнесенная ко всему интервалу  $\theta = 1$ .

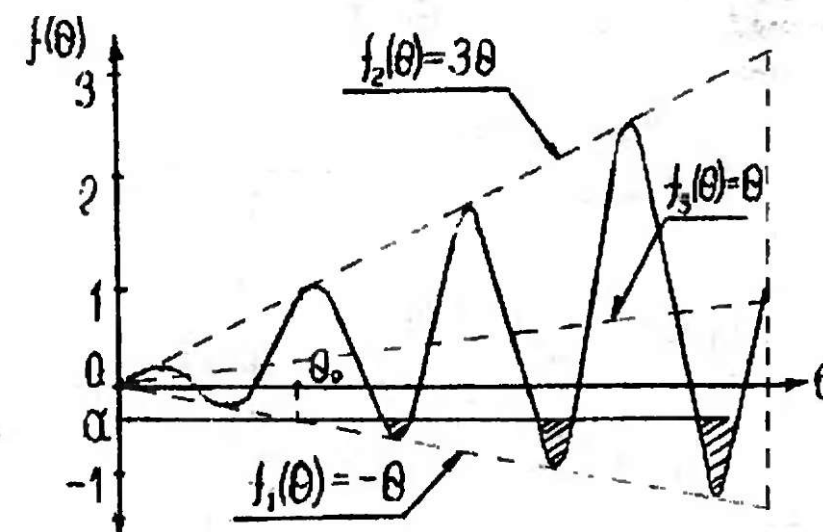


Рис. 7

Получены следующие аналитические выражения интегральных функций распределения энергии двухлучевого метеорного частотно-манипулированного сигнала для четырех вариантов наложения и для усредненной функции распределения:



$$F_1(x) = F_2(x) = \begin{cases} \frac{1}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(1-x)/3]} \arccos \left[ \frac{|x-1|}{2(1-(l-1)/K)} + \frac{1}{2} \right], & 0 < x \leq 1 \\ \frac{x-1}{3} + \frac{1}{K} \sum_{l=E[K(2-x)/4]}^{E[K(4-x)/3]} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left[ \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} - \frac{1}{2} \right] \right] + \\ + \frac{1}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(2-x)]} \arccos \left[ \frac{1}{2} - \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} \right], & 1 < x \leq 2 \\ 1 - \frac{1}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(4-x)/3]} \arccos \left[ \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} - \frac{1}{2} \right], & 2 < x \leq 4. \end{cases} \quad (5)$$

$$F_3(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_4(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \arccos |(x-2)/2|, & 0 < x \leq 2 \\ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos |(x-2)/2|, & 2 < x \leq 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$F(x) = \frac{1}{2} F_1(x) + \frac{1}{4} F_3(x) + \frac{1}{4} F_4(x) =$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \arccos \left| \frac{x-2}{2} \right| + \frac{1}{2K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(1-x)/3]} \arccos \left[ \frac{|x-1|}{2(1-(l-1)/K)} + \frac{1}{2} \right], & 0 < x \leq 1 \\ \frac{\arccos((x-2)/2)}{4\pi} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{x-1}{3} + \frac{1}{K\pi} \sum_{l=E[K(2-x)/4]}^{E[K(4-x)/3]} \arccos \left[ \frac{1}{2} - \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{K} \sum_{l=E[K(2-x)]+1}^{E[K(4-x)/3]} \left[ 1 - \frac{\arccos \left( \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} - \frac{1}{2} \right)}{\pi} \right] \right\}, & 1 < x \leq 2 \\ \frac{1}{4} \left[ 1 - \frac{\arccos((x-2)/2)}{\pi} \right] + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{K\pi} \sum_{l=1}^{E[K(4-x)/3]} \arccos \left[ \frac{x-1}{2(1-(l-1)/K)} - \frac{1}{2} \right] \right\}, & 2 < x \leq 4. \end{cases} \quad (8)$$

На основе полученных выражений были вычислены дифференциальные функции распределения энергии двухлучевого метеорного частот-

но-манипулированного сигнала на элементарном тактовом интервале. Графики дифференциальных функций распределения показаны на рис. 8.

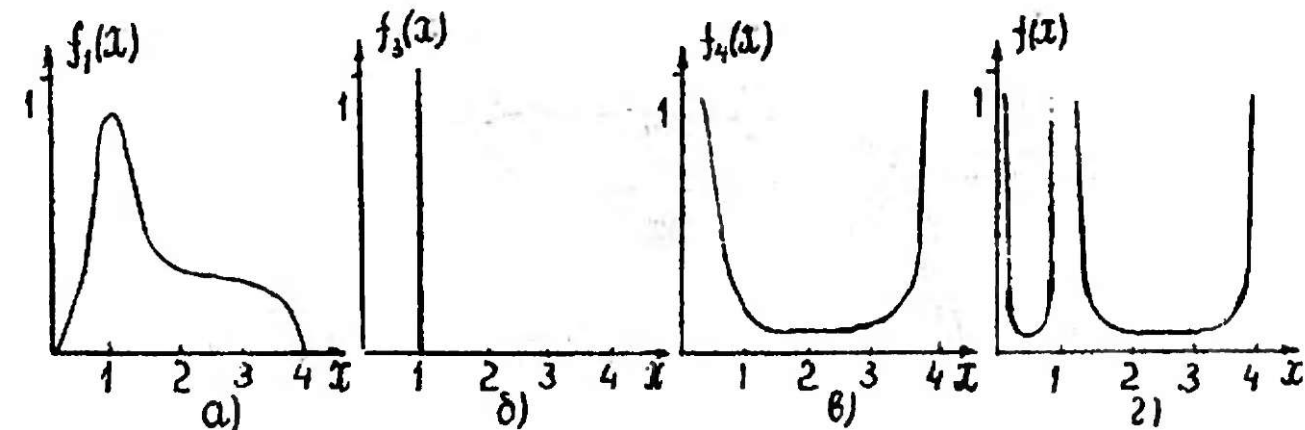


Рис. 8

Из анализа этих графиков следует важный вывод: существуют три разных типа распределения энергии, из которых  $f_1(x)$  имеет малую плотность энергии в области *замираний*,  $f_3(x)$  есть дельта-функция, т.е. вообще не имеет *замираний*,  $f_4(x)$  имеет большую плотность энергии в области *замираний*. Последний случай соответствует наложению однородных элементов  $[\omega_1, \omega_2]$ . Поскольку для частотно-манипулированного сигнала только одна из четырех частных функций распределения имеет глубокие *замирания*, а для фазоманипулированного сигнала две из четырех и, кроме того, одна функция для ЧМ сигнала вообще не имеет *замираний*, это означает, что частотно-манипулированный сигнал по сравнению с фазоманипулированным имеет в среднем реже *замирания*. Амплитуду двухлучевого частотно-манипулированного сигнала также нельзя описывать релейским законом.

Была вычислена вероятность правильного обнаружения двухлучевого метеорного частотно-манипулированного сигнала по той же методике, что и для двухлучевого метеорного фазоманипулированного сигнала, для усредненной кривой (рис. 8г). Для этой цели была проведена аппроксимация кривой и получено сложное выражение для вероятности правильного обнаружения, подобное выражению (4), для вычисления которого была составлена программа и построен график зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум (рис. 9).

Там же для сравнения нарисован график правильного обнаружения для усредненной кривой распределения энергии двухлучевого фазоманипулированного сигнала. Из графика видно, что вероятность обнаружения частотно-манипулированного сигнала больше вероятности обнаружения фазоманипулированного сигнала, причем особенно это становится заметным для больших значений вероятностей обнаружения. Так для вероятности обнаружения  $D = 0,96$  отношение сигнал/шум  $\sqrt{2E_1/N_0}$  для фазоманипулированного сигнала должно быть в 1,5 раза больше.

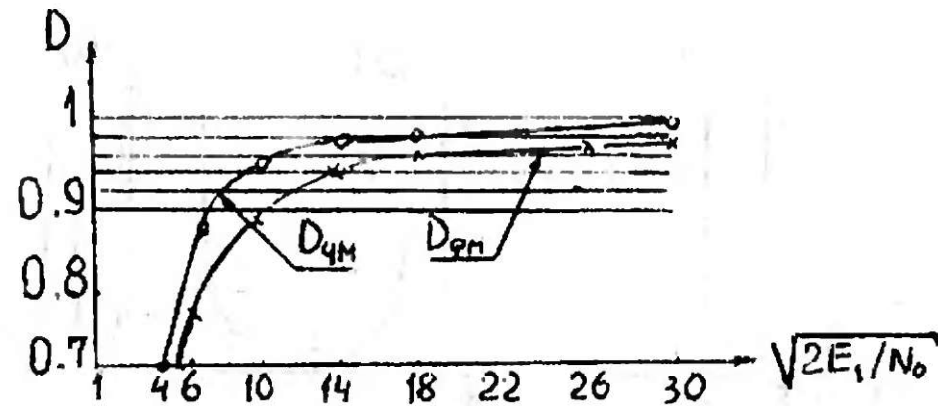


Рис. 9

В третьей главе определяются погрешности временной отметки двухлучевого метеорного сигнала двумя способами: по моменту пересечения порогового уровня огибающей двухлучевого сигнала и по моменту максимума напряжения на выходе приемника, если на входе действует двухлучевой сигнал.

В первом случае на рис. 10 представлена блок-схема приемника, обрабатывающего радиоимпульс с прямоугольной огибающей. На выходе фильтра имеем сигнал вида  $u_{\text{вых}}(t) = A_1 (1 - e^{-\alpha t}) \cos \omega_0 t$ , где  $2\alpha$  - полоса пропускания фильтра. Момент пересечения порога определяется из уравнения  $A_1(1 - e^{-\alpha t}) = u_{\text{пор}}$ , откуда

$$t_{\text{пор}} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{m}{m-1}, \quad \text{где } m = A_1/u_{\text{пор}}$$

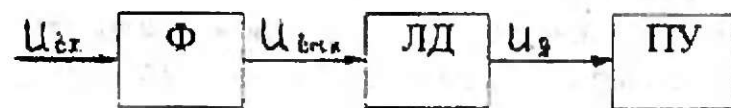


Рис. 10

Ф - фильтр, ЛД - линейный детектор, ПУ - пороговое устройство

Среднеквадратичное значение момента пересечения порога однолучевым сигналом определяется по формуле

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{|u'_g(t)|_{t=t_{\text{пор}}}} = \frac{\sigma}{\alpha A_1(m-1)/m}, \quad (9)$$

где  $\sigma$  - среднеквадратичное значение шума. Если сигнал двухлучевой, в котором второй луч сдвинут относительно первого на  $t_3$ , или по фазе на  $\varphi = \omega_0 t_3$ , то на входе порогового устройства будет иметь сигнал:

$$u_{g_2}(t) = A_1 \left[ e^{-2\alpha t} (1 + 2\cos\varphi e^{\alpha t_3} + e^{2\alpha t_3}) - 2e^{-\alpha t} (1 + \cos\varphi) \cdot (1 + e^{\alpha t_3}) + 2(1 + \cos\varphi) \right]^{1/2} \quad (10)$$

Для функции  $u_{g_2}(t)$  построен график семейства кривых с параметром  $\varphi$  (рис. 11), из которого видно, что при некоторых, близких к  $\pi$ , значениях

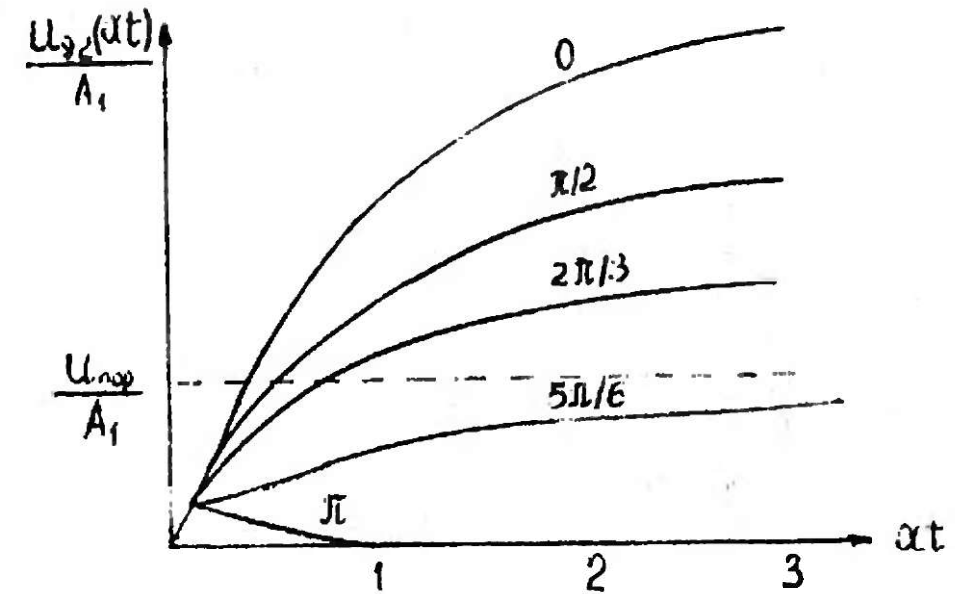


Рис. 11

угла  $\varphi$  огибающая двухлучевого сигнала не пересекает порога. Оценивается граничное значение  $\varphi_{\text{гр}}$ , выше которого огибающая уже не пересекает порога

$$\varphi_{\text{гр}} = \arccos \left( \frac{1}{2m^2} - 1 \right). \quad (11)$$

Так, для  $m = 1,5$  имеем  $\varphi_{\text{гр}} = 141^\circ$ .

Вычисляется пороговое значение  $\varphi_{\text{пор}}$ , для которого выполняется неравенство  $t_{\text{пор}} < \tau_u$ :

$$\varphi_{\text{пор}} = \arccos \left( \frac{0.63}{m^2} - 1 \right). \quad (12)$$



Вычисляется значение крутизны огибающей двухлучевого сигнала и затем значение среднеквадратичной погрешности момента прихода двухлучевого метеорного радиоимпульса:

$$\delta_2 = \frac{\delta_1}{2 \cos(\varphi/2)} \quad (13)$$

Определяется среднее значение  $M(\sigma_2) = 0,7\sigma_1$  и дисперсия  $D(\sigma_2) = 0,52\sigma^2$ , т.е. среднее значение оказалось меньше, чем для однолучевого сигнала. Этот результат объясняется тем, что учитывается лишь дисперсия, вызванная флуктуационным шумом, которая зависит от крутизны огибающей, а крутизна двухлучевого сигнала может быть и больше и меньше крутизны однолучевого сигнала. Но часть сигналов с малой крутизной была отброшена путем стробирования, поэтому получился лучший результат.

Дополнительную ошибку в момент отсчета сигнала вносит случайность момента пересечения порога, вызванная случайностью угла  $\varphi$ . Вычислена дисперсия и среднеквадратическое отклонение момента пересечения порога, вызванная случайным углом  $\varphi$ :

$$D_\varphi = \frac{196}{\alpha^2 m^2}, \quad \delta_\varphi = \frac{14}{\alpha m} \quad (14)$$

Определена суммарная дисперсия  $D_\Sigma = D_\phi + D(\sigma_2)$  и суммарное среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\Sigma$ . Показано, что для одинаковых значений  $m$  и  $\rho = A_1 / \sigma$  отношение

$$\sigma_\Sigma / \sigma_1 = 3,2 \quad (15)$$

т.е. среднеквадратическая погрешность пересечения порога двухлучевым метеорным сигналом в среднем в 3,2 раза больше среднеквадратической погрешности пересечения порога однолучевым метеорным сигналом.

Для второго случая, когда вычисляется среднеквадратическая погрешность временной отметки двухлучевого метеорного сигнала по максимуму выходного напряжения, используемая блок-схема приемника, обрабатывающего принимаемый сигнал, представлена на рис. 12.

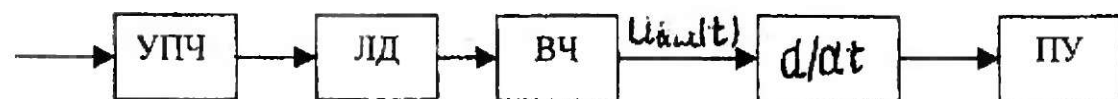


Рис. 12

УПЧ – усилитель промежуточной частоты; ЛД – линейный фильтр; ВУ – видеоусилитель;  $d/dt$  – дифференцирующее устройство; ПУ – пороговое устройство.

В основе определения дисперсии момента прихода сигнала по максимуму выходного напряжения лежит формула:

$$\delta_1^2 = \frac{\left[ \frac{d}{dt} \tilde{u}_{\text{вых}}(t) \right]^2}{\left[ \frac{d^2}{dt^2} \overline{u_{\text{вых}}}(t) \right]} = \frac{N_0}{\int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{d}{dt} S_m(t) \right]^2 dt} \quad (16)$$

где  $\overline{u_{\text{вых}}}(t)$  – математическое ожидание напряжения на выходе видеоусилителя,  $\tilde{u}_{\text{вых}}(t)$  – случайная составляющая этого напряжения,  $S_m(t)$  – огибающая сигнала на входе УПЧ,  $N_0$  – спектральная плотность помехи. Для однолучевого входного сигнала  $S(t) = A e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t$  с колокольной огибающей  $S_m(t) = A e^{-\alpha t}$  находится дисперсия максимума выходного напряжения

$$\delta_1^2 = \frac{1}{(A^2/N_0) \sqrt{2\pi} \alpha} \quad (17)$$

где  $\alpha$  – полоса пропускания фильтра.

Для малых времен задержки ( $t_3 < 1/2\alpha$ ) второго луча относительно первого получена оценка дисперсии временной отметки  $\sigma_{21}^2$  при приеме двухлучевого метеорного сигнала приемником, согласованным с огибающей однолучевого сигнала:

$$\sigma_{21}^2 = \frac{1}{(A^2/N_0) \cdot \alpha \sqrt{2\pi} \cos^2(\varphi/2)} \quad (18)$$

Сравнение  $\sigma_{21}^2$  с  $\sigma_1^2$  показывает, что

$$\rho = \frac{\sigma_{21}^2}{\sigma_1^2} = \frac{1}{\cos^2(\varphi/2)} \quad (19)$$

Среднее значение  $M[\rho] = 2$ , т.е. при приеме двухлучевого метеорного сигнала дисперсия в среднем увеличивается в два раза, а среднеквадратическая ошибка в 1,4 раза.

В целом, оценивая результаты данной главы, приходим к выводу, что, как и ожидалось, среднеквадратическая ошибка момента прихода двухлучевого метеорного радиоимпульса увеличивается. Получены количественные оценки этого увеличения: в 3,2 раза для момента пересечения по уровню и в 1,4 раза по моменту максимума выходного напряжения.

В четвертой главе исследуется система синхронизации шкал времени в метеорном многолучевом радиоканале с опорной шкалой времени и с инверсией многолучевого сигнала. Прохождение сигнала в такой системе

поясняется рис. 13, где из пункта А в пункт Б излучается сигнал  $S(t)$ , представляющий отрезок синусоиды длительностью  $\tau_u$ . Этот сигнал создает в пункте Б вследствие многолучевости  $n$  перекрывающихся между собой сигналов  $S_i(t)$ . Если каждую из копий  $S_i(t)$  задержать относительно опорной шкалы времени  $S_B(t)$  так, как показано на рис. 13 и ретранслировать, то первой ретранслируется копия  $S_n(t)$ , а первая копия  $S_1(t)$  ретранс-

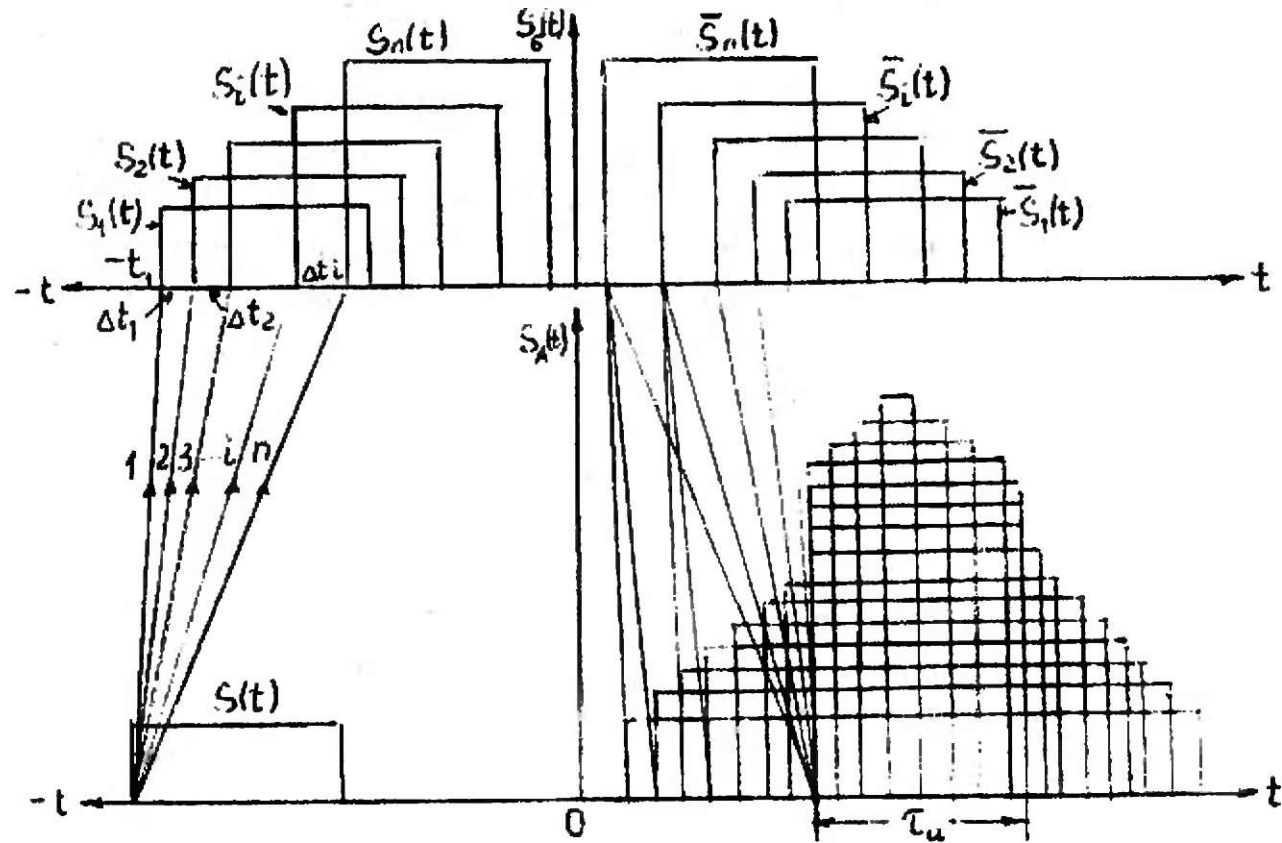


Рис. 13

лируется последней, т.е. имеет место инверсия последовательности сигнала  $S_i(t)$ . Каждая из  $n$  копий создает в пункте А еще  $n$  копий, т.е. в пункт А придет  $n^2$  сигналов. Если в пункте Б перед ретрансляцией сигнала  $S_i(t)$  перейти к сигналу  $S_i(t_1 - t)$ , т.е. к его инверсному варианту и затем ретранслировать в указанном выше порядке, то в пункте А на интервале  $\tau_u$  (рис. 13) будет иметь место когерентное сложение  $n$  сигналов, остальные  $(n^2 - n)$  сигналов складывается некогерентно и образуют помеху, которая называется системным шумом.

Определяются характеристики системного шума на интервале  $\tau_u$ . Весь интервал  $\tau_u$  разбит на подинтервалы, на каждом из которых суммируются синусоидальные сигналы с одинаковыми по предположению амплитудами  $A$  и разными фазами. Дисперсия системного шума определяется числом подинтервалов и числом сигналов, суммируемых на них. Показано, что число подинтервалов  $\gamma = n^2 - n + 1$ , а среднее число суммируемых сигналов  $\xi_0 = 0,6n^2 - n$ . Определяется дисперсия системного шума

$$D\{u_q\} = E^2 \frac{f_1(n) + f_2(n)}{f_3(n)}, \quad (20)$$

где  $E = \frac{A^2 \tau_u}{2}$  - энергия сигнала,

$$f_1(n) = 0,75n^4 - 1,75n^3 + 1,75n^2 - n$$

$$f_2(n) = 0,416n^6 - 1,49n^5 + 1,58n^4 - 0,4n^3 - 0,5n^2 + 0,7n$$

$$f_3(n) = n^4 - 2n^3 + 3n^2 - 2n + 1$$

Оцениваются характеристики обнаружения многолучевого инверсного сигнала в случае неперекрывающихся лучей, т.е. лучи  $S_i(t)$  на рис. 13 не перекрываются между собой. На интервале  $\tau_u$  суммируются когерентно  $n$  лучей. В этом случае системный шум отсутствует, поэтому оценивается отношение сигнал/шум для флуктуационного шума. Показано, что отношение сигнал/шум в пункте А для инверсного сигнала будет в  $n$  раз больше, чем для эквивалентного по энергии однолучевого сигнала. Определены вероятности правильного обнаружения инверсного сигнала и эквивалентного ему одиночного сигнала согласно критерию Неймана-Пирсона и построен график (рис. 14) вероятности обнаружения, как функции числа лучей  $n$  для этих двух сигналов, который показывает преимущества инверсного сигнала, так как уже при  $n = 3$  вероятность обнаружения  $D = 0,9998$  для инверсного сигнала.

Исследуются возможности приема многолучевого инверсного сигнала для случая перекрывающихся лучей (рис. 13). Показано, что отношение сигнал/системный шум на входе приемника ретранслированного сигнала

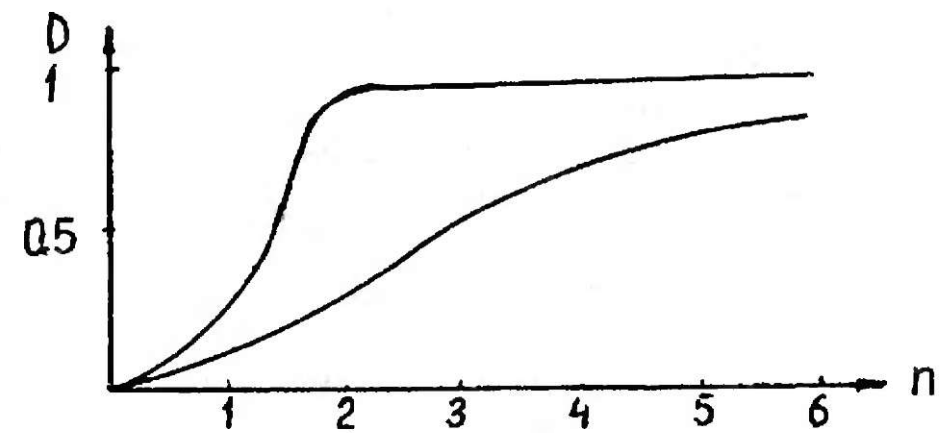


Рис. 14

1 - инверсный сигнал, 2 - эквивалентный одиночный сигнал

$$P_{вз} = \frac{1}{0,75 - 1/n}, \quad (21)$$



а отношение сигнал/системный шум на выходе этого приемника, если приемник корреляционный, равно

$$\rho_{\text{вых}} = \frac{n^2 \cdot f_3(n)}{f_1(n) + f_2(n)} \quad (22)$$

Графики зависимостей (21) и (22) приведены на рис. 15 и 16, которые показывают, что выигрыш максимален при  $n = 2, 3$  и падает до 1,33 для  $\rho_{\text{вх}}$  и до 2,4 для  $\rho_{\text{вых}}$  при увеличении числа лучей.

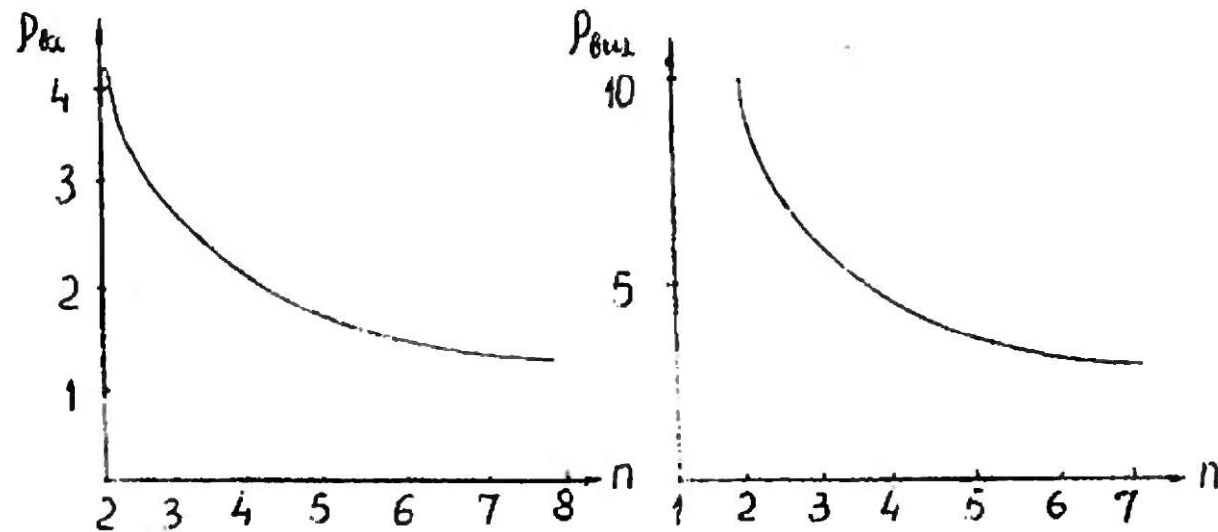


Рис. 15

Рис. 16

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Проведен анализ многолучевого метеорного радиоканала с конечным числом лучей. Основные результаты и их новизна могут быть сформулированы следующим образом:

1. Впервые рассмотрены все четыре случая наложения двоичных фазоманипулированных и частотно-манипулированных метеорных радиосигналов и определена их энергия на элементарном тактовом интервале при одной случайной величине – времени задержки второго луча относительно первого.
2. Впервые получены аналитические выражения интегральных функций распределения энергии двухлучевых фазоманипулированных и частотно-манипулированных метеорных радиосигналов для четырех вариантов наложения лучей и выведено аналитическое выражение для усредненной интегральной функции распределения энергии двухлучевого фазоманипулированного и частотно-манипулированного сигналов на элементарном тактовом интервале.
3. На основе полученных аналитических выражений ИФР энергии двухлучевых ФМ и ЧМ сигналов вычислены соответствующие ДФР энергии. Ус-

тановлено, что существуют два принципиально разных типа распределения энергии: 1) при наложении однородных сигналов основная энергия сосредоточена на краях энергетического интервала, 2) при наложении разнородных сигналов основная доля энергии сосредоточена ближе к центру энергетического интервала.

4. Проведена количественная оценка ИФР энергии в интервале, где энергия двухлучевого сигнала меньше энергии однолучевого сигнала. Установлено, что при наложении однородных сигналов величина уменьшения энергии в среднем в три раза больше, чем при наложении разнородных сигналов.

5. Определены вероятности обнаружения двухлучевых ФМ и ЧМ радиосигналов. Установлено, что вероятность обнаружения двухлучевого ЧМ сигнала больше вероятности обнаружения двухлучевого ФМ сигнала, но обе эти вероятности меньше вероятности обнаружения сигнала, у которого амплитуда распределена по закону Релея.

6. Впервые проведена оценка погрешности момента прихода двухлучевого радиоимпульса. Определена среднеквадратическая ошибка момента прихода двухлучевого радиоимпульса с прямоугольной огибающей по моменту пересечения порога. Установлено, что эта ошибка в 3,2 раза превышает среднеквадратическую ошибку момента пересечения порога однолучевым радиоимпульсом. Определена среднеквадратическая ошибка момента прихода двухлучевого радиоимпульса с колокольной огибающей по моменту максимума выходного напряжения. Установлено, что эта ошибка в 1,4 раза превышает среднеквадратическую ошибку, определенную по моменту максимума выходного напряжения для однолучевого радиоимпульса с колокольной огибающей. С целью снижения среднеквадратической ошибки выявлена необходимость перехода к радиосигналам с более сложной структурой, например, ШПС сигналам.

7. Исследована возможность использования в метеорных многолучевых радиоканалах синхронизации шкал времени многолучевого инверсного сигнала с опорной шкалой времени. Определены характеристики системного шума в многолучевом инверсном метеорном радиоканале с опорной шкалой времени на интервале когерентного сложения  $n$  лучей, в частности, дисперсия системного шума. Определена вероятность обнаружения инверсного сигнала в случае неперекрывающихся лучей, показаны преимущества такого сигнала в сравнении с эквивалентным по энергии одиночным сигналом. Рассмотрена возможность приема инверсного сигнала для случая перекрывающихся лучей. Получены оценки для отношения сигнал/шум ( $\rho$ ) на входе приемника и на выходе приемника после корреляционной обработки сигнала. Показано, что инверсный многолучевой сигнал с опорной шкалой времени дает выигрыш в отношении сигнал/шум для небольшого числа лучей ( $n = 2, 3, 4$ ) от  $\rho = 11$  до  $\rho = 1,33$ .



## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панковец В.В. Вывод интегральной функции распределения энергии двухлучевого фазоманипулированного сигнала. – М.: ВИНТИ, 1994. – № 3093, В94 – 19 с.
2. Панковец В.В., Панковец Д.В. Интегральные и дифференциальные функции распределения энергии двухлучевого фазоманипулированного сигнала. // Радиотехника. – 1997. – Т. , № 10. – С.44-48.
3. Панковец В.В., Панковец Д.В. Вывод интегральной функции распределения энергии двухлучевого частотно-манипулированного сигнала. – М.: ВИНТИ, 1994, № 3092, В 94. – 19 с.
4. Панковец В.В., Панковец Д.В. Интегральные функции распределения энергии двухлучевого частотно-манипулированного сигнала. / П Республиканская научная конференция молодых ученых и специалистов. Тез. докл. – Казань, 1996. – С.88.
5. Панковец В.В. Оценка погрешности временной отметки по положению максимума выходного напряжения в условиях двухлучевого сигнала.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1990. – Вып. 18. – С.89-98.
6. Панковец В.В., Плеухов А.Н. Определение погрешности пересечения уровня в условиях двухлучевого сигнала.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1988. – Вып. 17. – С.57-64.
7. Панковец В.В., Сидоров В.В. Характеристики системного шума в синхронной системе с опорной шкалой времени.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. – 1991. – Вып. 19. – С.85-94.
8. Панковец В.В., Сидоров В.В., Школдов П.А. Характеристики обнаружения многолучевого сигнала в синхронной системе с опорной шкалой времени.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. – 1988. – Вып. 17. – С.64-71.
9. Панковец В.В., Сидоров В.В. О возможности приема многолучевого инверсного сигнала в случае перекрывающихся лучей.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. – 1991. – Вып. 19. – С.94-101.
10. Панковец В.В. Оценка дисперсии шума в системе с инверсным сигналом.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. – 1991. – Вып. 19. – С.79-85.
11. Панковец В.В., Панковец Д.В., Нугманов И.С. Функции распределение энергии двухлучевого частотно-манипулированного сигнала.// Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та. – 2001. – Вып. 20. – С.30-36.